

# 步降试验数据仿真及其验证方法

王绍山<sup>1</sup>, 宣兆龙<sup>1</sup>, 王耀冬<sup>1</sup>, 郭宇<sup>2</sup>

(1. 军械工程学院, 石家庄 050003; 2. 68128部队, 甘肃 武威 733000)

**摘要:** **目的** 设计并验证步降应力试验数据的仿真方法, 为开展其他仿真分析提供理论支撑。方法通过蒙特卡罗方法, 根据步降试验的基本原理, 对其试验数据进行仿真过程分析, 根据仿真结果回推既定参数, 通过比较得到仿真误差。结果 仿真数据回推的参数与给定参数的误差为0.732%。结论 仿真误差在可控范围内, 说明仿真方法及其验证方法有效, 保证了仿真的可行性。

**关键词:** 步降应力加速寿命试验; 数据仿真; 数据折算

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2016.01.027

**中图分类号:** TJ01; TB114 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2016)01-0147-04

## Data Simulation of Step-down-stress Accelerated Life Test and Its Verification Method

WANG Shao-shan<sup>1</sup>, XUAN Zhao-long<sup>1</sup>, WANG Yao-dong<sup>1</sup>, GUO Yu<sup>2</sup>

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. 68128 Unit of PLA, Wuwei 733000, China)

**ABSTRACT: Objective** To design and verify simulation method of step-down-stress accelerated life test(SDSALT), in order to provide theoretical support for other simulation and analysis. **Methods** According to the basic principle of SDSALT, simulation procedure of test data was analyzed by Monte-Carlo. The simulation error was obtained by comparing the simulation result and the known parameter. **Results** The error between the simulation result and the given parameter was 0.732%. **Conclusion** The simulation error was acceptable, which proved that this simulation method and its verification method were effective, ensuring the feasibility of simulation.

**KEY WORDS:** SDSALT; data simulation; data conversion

典型的装备产品寿命服从“浴盆曲线”,按照失效率特点可以分为三个阶段,即早期失效(具有逐渐降低的失效率)、随机失效(具有恒定不变的失效率)和耗损失效(具有逐渐增大的失效率)<sup>[1]</sup>。加速寿命试验从开始的恒定应力试验到后来的步进应力试验,其理论都是将试验样品从正常开始一步步加速到失效,其

失效是逐步累加,效率相对较低<sup>[2]</sup>。在此背景下,步降应力加速试验的设想被提出来。在保证样品失效机理保持不变的情况下,将步进应力加速试验中的应力加载顺序进行颠倒,从高应力开始加载,逐步降低所加载的应力水平,这样会使样品的失效在前期就大量累加,使其失效时间大大提前,且不影响试验的正常

收稿日期: 2015-08-07; 修订日期: 2015-09-07

Received: 2015-08-07; Revised: 2015-09-07

作者简介: 王绍山(1990—),男,硕士研究生,主要研究方向为弹药保障与安全技术。

**Biography:** WANG Shao-shan(1990—), Male, Master graduate student, Research focus: ammunition support and security technology.

通讯作者: 宣兆龙(1976—),男,博士,副教授,主要研究方向为装备防护。

**Corresponding author:** XUAN Zhao-long(1976—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: equipment protection.

评价,降低了试验代价。

步降应力加速试验就是通过对试验样本加载逐步降低的应力来进行加速试验,通过试验结果来对样本的寿命特征进行分析<sup>[3]</sup>。在当今世界,在产品可靠性不断提高的情况下,步降应力加速寿命试验因其所需样本少、试验时间短而受到广泛青睐。

### 1 步降应力加速寿命试验

在进行步降应力加速试验时,对样品首先施加高应力,在达到试验设定的条件(定数或定时)后,将应力下降到另一水平,重复上述操作,直到达到规定条件。其应力加载过程如图1所示。

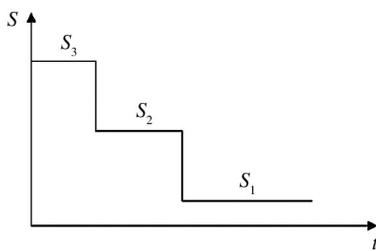


图1 步降应力加速寿命试验应力加载

Fig.1 Stress load of step-down-stress accelerated life test

从步降应力加速试验开始出现以来,大量的学者对其进行了更加深入的研究。张春华<sup>[3-5]</sup>等首先对步降应力加速试验进行了介绍,并通过分析其理论模型、仿真数据以及对比实验对其高效性进行了研究。通过建立三步分析法对数据的折算和之后的分析进行了深入的探讨,对其在我国的广泛传播做出了重要贡献。在此基础上,徐广<sup>[6]</sup>、谭伟<sup>[7]</sup>等分别对步降应力加速寿命试验优于步加试验的条件和步降试验的统计分析进行了改进,进一步论证了步降应力试验的优越性。其后,大量的学者<sup>[8-10]</sup>在步降试验的优化设计方面进行了更加深入的研究。

步降试验一个重要的步骤就是对数据的统计分析,而试验所得的样品失效数据是统计分析的关键所在。试验数据仿真就是为了充分利用样品的先验信息,采用 Monte-Carlo 方法模拟试验过程,得到仿真数据,为试验的统计分析做好铺垫。

### 2 步降试验数据仿真

#### 2.1 先验信息的获取

在进行步降应力加速寿命试验数据仿真之前,应

当明确试验的先验信息,即获得样本的试验之前获得的经验和历史资料,其中包括加速模型、寿命分布以及同一失效机理下试验样本所承受的最高应力水平等<sup>[11]</sup>。

先验信息可分为定性和定量两种<sup>[12]</sup>。定性的先验信息可以通过工程实际经验、专家经验以及相似产品信息等途径来获得,而定量的先验信息则需要对试验样品进行摸底试验来获得。

#### 2.2 方案描述

步降应力加速寿命试验中的应力水平有  $k$  个,即:  $S_1 > S_2 > \dots > S_k$ , 且最小应力水平应当高于样品正常环境下的使用应力水平。试验样品总数为  $n$ , 采用定数截尾方式(各个应力下的截尾数是  $r_i$ , 其对应的时间是  $t_{ir_i}$ ), 各应力水平之间样品失效时间的换算关系为

$$t_{ij} = \frac{\eta_j}{\eta_i} t_i$$

#### 2.3 基本假设

步降试验数据仿真是基于以下假设。

1) 样品在不同应力水平下,其寿命服从威布尔分布,即其分布函数为:

$$F(t) = 1 - \exp\{-(t/\eta)^m\}, \quad t \geq 0$$

式中:  $m$  是形状参数;  $\eta$  是特征寿命<sup>[13]</sup>。

2) 特征寿命  $\eta$  与应力满足加速模型  $\ln \eta = a + b\varphi(S)$ , 其中  $\varphi(S)$  是应力  $S$  的函数。如果  $S$  为温度, 则  $\varphi(S) = 1/S$ ; 如果  $S$  为电压, 则  $\varphi(S) = \ln S$ 。

3) 样品在各应力水平下的失效机理不变, 即  $m$  值不变。

4) 样品在试验时满足 Nelson 累积失效模型<sup>[14]</sup>, 即产品的残余寿命仅依赖于当时已累积失效部分和当时的应力水平, 与累积方式无关。

#### 2.4 仿真步骤

1) 利用已知的先验信息计算各应力水平下样品的特征寿命  $\eta_i$ :

$$\eta_i = \exp(a + b\varphi(S_i))$$

2) 产生  $n$  个  $(0, 1)$  随机数  $P_i (i=1, 2, \dots, n)$ , 将其按顺序进行排序, 记为  $g_i$ , 将前  $r (r = \sum_{i=1}^k r_i)$  个随机数按试验在各应力下预先设定的失效数进行分配, 记为  $h_i$ 。

3) 利用反函数法计算失效时间  $t$ , 同时生成各应力  $S_i$  下的寿命数据:

$$t_i = \eta_i [-\ln(1-h_i)]^{1/m}, \quad i=1, 2, \dots, k \tag{1}$$

式中: $k$ 为应力水平数。

4) 将数据统计如下:

$$\begin{aligned}
i = 1 & \quad t_{11}, t_{12}, \dots, t_{1r_1} \\
i = 2 & \quad t_{21}, t_{22}, \dots, t_{2r_2} \\
& \quad \vdots \\
i = k & \quad t_{k1}, t_{k2}, \dots, t_{kr_k}
\end{aligned}$$

式中: $r_i$ 表示第*i*个应力水平下的失效个数。

### 2.5 仿真数据的验证

为了验证上述仿真出来的数据的有效性,可利用数据折算方法对其进行验证。

将式(1)中得到的各应力下的寿命数据进行折算,第一个应力不需折算,为该应力下的实际寿命数据;其后的每个应力下,样品失效数据都并非是该应力下的实际寿命,应将前面应力时间折算到该应力下。

当*i*=1时,直接利用公式:

$$m = \frac{1}{\sum_{i=1}^{r_1} C(n, r_1, i) \ln t_{1i}}, \quad r \leq 25 \quad (2)$$

或:

$$m = \frac{1}{\sum_{i=1}^{r_1} |\ln t_{1i} - \ln t_{1s}|}, \quad r > 25 \quad (3)$$

计算 $m_1$ 值。

当*i*=2时,利用数据折算关系 $t_{ij} = \frac{\eta_j}{\eta_i} t_i$ 将第一应力下样品失效数据折算到该应力下,即为 $t_{211}, t_{212}, \dots, t_{21r_1}, t_{21}, t_{22}, \dots, t_{2r_2}$ ,然后利用式(2)或式(3)计算 $m_2$ 值。当*i*=3时,利用数据折算公式将第一应力和第二应力下样品失效数据折算到该应力下,生成新的数据,即为 $t_{311}, t_{312}, \dots, t_{31r_1}, t_{321}, t_{322}, \dots, t_{32r_2}, t_{31}, t_{32}, \dots, t_{3r_3}$ ,然后利用式(2)或式(3)计算 $m_3$ 值。其他应力水平下以此类推计算 $m_i$ 值。

为解决仿真数据的随机性,提高数据的可靠性,可将以上步骤重复进行多次,然后计算 $m_i$ 的平均值。

### 3 实例验证

采用文献[15]中的普通照明灯泡进行分析,普通照明灯泡在工作过程中,受到电压变化的影响较大,其正常使用电压为220 V。在试验中,设定4个加速应力水平分别为300,287,270,250 V,试验样品失效数据见表1,求得 $m=3.827, \ln \eta=81.439 18-13.713 78 \ln V$ 。

以该试验的试验结果作为先验信息,可按照仿

表1 灯泡的加速寿命试验失效数据

Table 1 ALT failure data of bulb

应力水平/V	失效数据/h
300	5.755, 5.943, 6.476, 8.150, 9.348, 9.446, 9.581, 9.640, 9.819, 9.898, 10.646, 10.887, 11.426, 11.554, 11.578, 11.659, 12.692, 13.072, 13.143, 13.342
287	1.472, 2.419, 3.331, 5.757, 7.092
270	0.209, 0.396, 0.806, 8.971, 9.0325
250	1.271, 2.392, 13.946, 20.725, 35.743

真数据的步骤进行仿真,其中一次的仿真数据如图2所示。

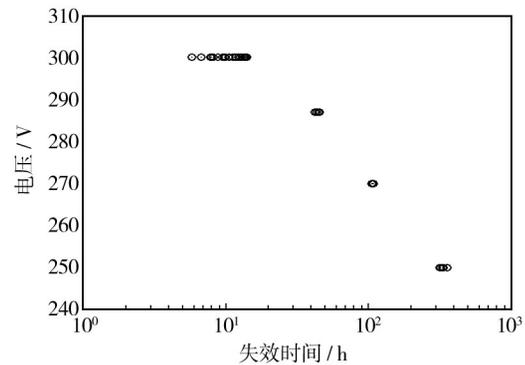


图2 灯泡步降试验仿真数据

Fig.2 SDSALT simulation data of bulb

利用基于加速因子的数据折算方法,通过上述步骤对上面仿真得到的多组数据进行折算分析,其各应力水平下形状参数 $m$ 的平均值见表2。根据表2,可以求出威布尔分布的形状参数 $m$ 的一致性估计,即:

$$\hat{m} = \frac{\sum_{i=1}^4 m_i r_i}{\sum_{i=1}^4 r_i} = 3.855$$

其相对误差为:

$$\Delta = \frac{|\hat{m} - m|}{m} = 0.732$$

表2 灯泡步降试验数据分析

Table 2 Analysis on data of SDSALT

<i>i</i>	应力 <i>S</i> /V	$m_i$
1	300	3.8722
2	287	3.8518
3	270	3.8325
4	250	3.8119

考虑到仿真数据的随机性以及计算方法中某些参数选值的不唯一性,根据工程实际,相对误差在5%

以内表明参数估计准确,即此次仿真数据是有效的,同时该验证方法是可行的。

## 4 结语

文中在分析步降应力加速寿命试验的基础上,对样品失效时间进行了仿真模拟,从理论上对其验证方法进行了步骤分析。以文献中的实例对以上理论进行了验证,结果表明,提出的数据仿真模拟及其验证方法可行,为步降应力加速寿命试验的数据仿真提供了一种新的方法,也为步降试验的统计分析做好了铺垫。

### 参考文献:

- [1] 江玉彬. 浴盆曲线在通信电源设备管理中的应用[J]. 通信电源技术, 2013, 30(1): 34—36.  
JIANG Yu-bin. Application of the Bathtub Curve in Management on Communication Power Supply Device[J]. Telecom Power Technology, 2013, 30(1): 34—36.
- [2] 赵保平, 孙建亮, 张韬, 等. 产品定寿与延寿中的几个环境问题[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 21—25.  
ZHAO Bao-ping, SUN Jian-liang, ZHANG Tao, et al. Some Problems of Environment Engineering in Life Estimation and Prolongation of Products[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 21—25.
- [3] 张春华. 步降应力加速寿命试验的理论和方法[D]. 长沙: 国防科技大学, 2002.  
ZHANG Chun-hua. Theory and Method of Step-down-stress Accelerated Life Testing[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002.
- [4] 张春华, 陈循, 温熙森. 步降应力加速寿命试验(上篇)——方法篇[J]. 兵工学报, 2005, 26(5): 661—665.  
ZHANG Chun-hua, CHEN Xun, WEN Xi-sen. Step-down-stress Accelerated Life Testing—Methodology[J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(5): 661—665.
- [5] 张春华, 陈循, 温熙森. 步降应力加速寿命试验(下篇)——统计分析篇[J]. 兵工学报, 2005, 26(5): 666—669.  
ZHANG Chun-hua, CHEN Xun, WEN Xi-sen. Step-down-stress Accelerated Life Testing—Statistical Analysis[J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(5): 666—669.
- [6] 徐广, 王蓉华. 步降应力加速寿命试验的效率分析[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2008, 37(5): 468—475.  
XU Guang, WANG Rong-hua. Efficiency Analysis of the Step-down Stress Accelerated Life Testing[J]. Journal of Shanghai Normal University(Natural Sciences), 2008, 37(5): 468—475.
- [7] 谭伟, 师义民, 孙玉东. 步降应力加速寿命试验的可靠性仿真[J]. 计算机仿真, 2011, 28(12): 80—83.  
TAN Wei, SHI Yi-min, SUN Yu-dong. Reliability Simulation for Step-down-stress Accelerated Life Testing[J]. Computer Simulation, 2011, 28(12): 80—83.
- [8] 汪亚顺, 张春华, 陈循. 步降应力加速寿命试验(续篇)——优化设计篇[J]. 兵工学报, 2007, 28(6): 686—691.  
WANG Ya-shun, ZHANG Chun-hua, CHEN Xun. Step-down-stress Accelerated Life Testing—Optimal Design[J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(6): 686—691.
- [9] 潘刚, 梁玉英, 吕萌, 等. 步降加速寿命试验优化设计 Monte-Carlo 仿真[J]. 电光与控制, 2013, 20(4): 77—84.  
PAN Gang, LIANG Yu-ying, LYU Meng, et al. Optimal Design of Step-Down-Stress Accelerated Life Test Based on Monte-Carlo Simulation[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(4): 77—84.
- [10] 吕萌, 蔡金燕, 潘刚, 等. 双应力交叉步降加速寿命试验优化设计 Monte-Carlo 仿真[J]. 电光与控制, 2013, 20(10): 96—101.  
LYU Meng, CAI Jin-yan, PAN Gang, et al. Optimal Design of Double-crossed-step-down-stress Accelerated Life Test Based on Monte-Carlo Simulation[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(10): 96—101.
- [11] 曹付齐, 李小换, 刘志成, 等. 某推进剂低温加速老化试验研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 88—92.  
CAO Fu-qi, LI Xiao-huan, LIU Zhi-cheng, et al. Low-temperature Accelerated Aging Study of a Propellant[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 88—92.
- [12] 汪亚顺. 仿真基加速试验方案优化设计方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.  
WANG Ya-shun. Research of Simulation-based Optimal Design for Accelerated Testing[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
- [13] 茆诗松, 王玲玲. 加速寿命试验[M]. 北京: 科学出版社, 1997.  
MAO Shi-song, WANG Ling-ling. Accelerated Life Test[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [14] NELSON W. Accelerated Life Testing Step-stress Models and Data Analysis[J]. IEEE Trans. on Reliability, 1980, 29(2): 103—108.
- [15] 陈循, 张春华, 汪亚顺, 等. 加速寿命试验技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.  
CHEN Xun, ZHANG Chun-hua, WANG Ya-shun, et al. Accelerated Life Testing Technology and Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.